

无线网络化系统自适应能量调度与协同控制

王 艳, 纪志成

(江南大学 电气自动化研究所, 江苏 无锡 214122)

摘要: 无线网络化系统(wireless networked control system, WNCS)中节点能量受限是影响系统性能的重要因素. 本文提出了一种自适应能量调度方法解决节点能量与控制需求间的矛盾, 在采样周期与能量消耗之间关系的基础上, 利用动态采样周期实现能耗的实时调节, 满足节点生存时间的需求. 进而, 将自适应采样的WNCS建模为一类具有短暂不确定切换信号的离散切换系统, 采用切换状态反馈控制律, 利用切换系统理论分析了系统的稳定性, 给出了系统渐近稳定时控制器增益与滞留时间需要满足的约束条件. 最后在Truetime1.5和MATLAB仿真平台上验证了文中提出的方法和结论.

关键词: 无线网络化系统; 自适应采样; 能量; 调度; 切换系统; 协同控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Adaptive energy scheduling and cooperative control for wireless networked control system

WANG Yan, JI Zhi-cheng

(Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: The limited amount of energy in nodes is a critical factor affecting the system performance in wireless networked control systems(WNCS). An adaptive energy scheduling method is proposed to compromise the energy conservation for the nodes and the energy consumption in the control. Based on the relation between the sampling period and the energy consumption, the energy consumption rates are adjusted online to satisfy the requirements of the node-span by employing dynamical sampling periods. Then, the adaptive sampling WNCS is modeled as a discrete switched system with a temporarily uncertain switching signal. For the system incorporated with the feedback of switched states, the stability is analyzed by using the switched system theory, and the constraints on the controller gains and residence time for the asymptotical stability of the system are derived accordingly. A numerical example validates the proposed approach on Truetime1.5 and MATLAB platforms.

Key words: wireless networked control system; adaptive sampling; energy; scheduling; switched system; cooperative control

1 引言(Introduction)

无线网络化系统作为一个新兴的研究领域, 近年来受到越来越多关注. 在无线网络控制系统中, 传感器设备能量一般由电池提供. 由于环境影响和能量耗尽, 节点容易出现故障, 在电池储能没有很大提升情况下, 如何高效使用能量来最大化网络生命周期是无线网络面临的重大挑战. 对于无线网络化系统(wireless networked control system, WNCS)来说, 如何有效解决无线网络的能量控制问题, 提高无线网络传输可靠性, 并施以合适的控制算法, 优化系统的控制性能是无线网络化系统需要解决的重要问题之一.

目前, 提高无线网络生命周期有两种方法: 1) 降低网络节点的能量消耗; 2) 平衡节点间的能量消

耗. COLANDAIRAJ等^[1]提出了一种变传输速率和变采样周期的动态调度策略. 该调度策略能够有效降低网络误帧率, 改善网络服务质量(quality of service, QoS), 却未考虑采样周期对节点能量的影响; W. Liang等^[2]提出了基于节点电池的剩余能量资源的路由策略(MBCR协议和MMBCR协议). MBCR协议实际上尽量使用能量资源较多的节点进行通信, 达到网络中各节点能量资源使用均衡的目的, 延长网络的生存时间; D. Kim等^[3]提出了基于节点生存时间的路由策略(MDR协议), 该协议通过计算节点的剩余能量与当前能量消耗的比值, 估算节点的生存时间. 然后选择具有最大生存时间的节点所在的路径进行传输. 现有的能量调度大多解决多个节点间的能量平衡问题, 未考虑如何通过降低单个节点

的能耗满足控制任务对节点寿命的需求问题。

因此, 本文从降低节点能耗出发, 首先阐述自适应采样策略, 通过在线预测节点的生存时间, 动态地调节采样周期, 以满足控制任务对节点生存时间的需求. 考虑变采样周期和时变网络诱导时延对系统性能的影响, 将WNCS建模为一类具有短暂不确定切换信号的切换系统, 采用切换状态反馈控制律, 给出了系统渐近稳定的充分条件.

2 问题描述(Problem description)

首先对WNCS的系统结构与工作原理进行简要描述, 并给出相关的定义; WNCS中节点的能量受限, 在对系统中节点能耗分析的基础上, 导出采样周期与节点生存时间之间的关系, 为能耗调度策略的设计提供依据.

2.1 WNCS结构框图(WNCS structure)

考虑图1所示的无线网络化系统结构, 系统由被控对象、传感器节点、控制器节点和执行器节点组成, 控制回路通过无线网络闭合.

控制量更新 当采样时刻到来时, 传感器节点根据当前的采样周期采集被控对象的输出或状态信息, 并将测量数据通过无线网络发送给相应的控制器节点, 控制器节点一旦接收到来自传感器的数据, 首先判断该数据是否比当前使用的数据“新”, 如果比当前的“新”, 则立刻采用该数据计算新的控制量, 并通过无线网络发送给相应的执行器节点; 否则丢弃该数据. 执行器节点在接收到“新”的控制量后, 立即更新被控对象输入, 若未接收到“新”的控制量, 则继续沿用上一采样周期内的控制量.

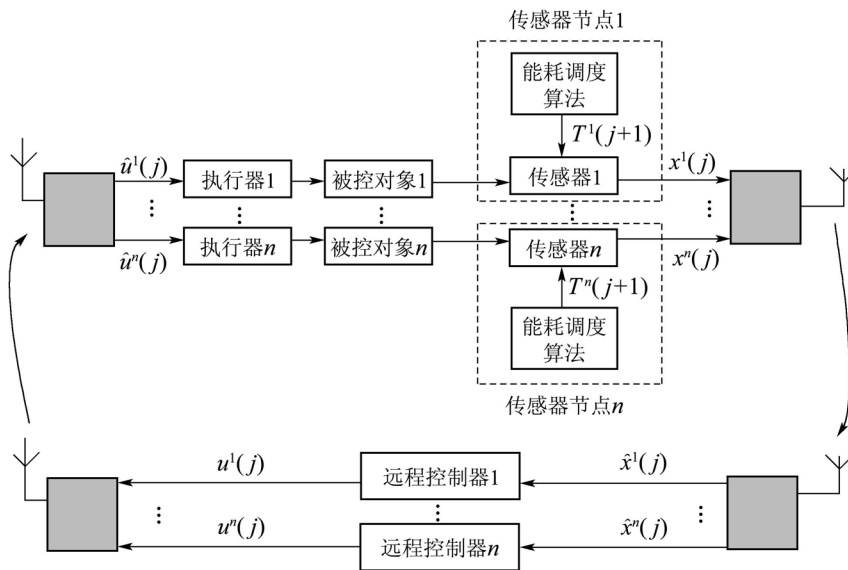


图 1 无线网络化系统结构图

Fig. 1 Structure of wireless networked control system

采样周期更新 采样周期等间隔更新, 其更新周期为 T_M , T_M 大于采样周期. 当采样周期更新时刻到来时, 传感器按照事先设计好的自适应采样算法, 计算新的采样周期值. 在新的采样时刻来临时, 传感器利用新的采样周期进行采样.

为便于分析, 对系统作如下合理假设:

假设 1 控制器能量由基站提供, 执行器与传感器能量由电池提供.

假设 2 传感器与执行器为时间驱动, 控制器为事件驱动, 数据采用单包传输且数据包带有时间戳.

假设 3 网络诱导时延有界, $\tau \in [0, \tau_{\max}]$, $\tau_{\max} > T_{\min}$, T_{\min} 代表系统采样周期的下限值.

相关定义:

- 1) 网络生命周期: 从网络开始工作到出现第一个能量耗尽的节点为止的时间长度.
- 2) 节点生存时间: 从节点开始工作到能量耗尽为止的时间长度.
- 3) 节点生存时间期望值: 系统要求节点具有的生存时间, 以 L_e 表示, 取决于具体的控制任务.
- 4) 更新周期: 连续两次调节采样周期的时间间隔, 以 T_M 表示.

2.2 WNCS 能量消耗分析(WNCS energy consumption analysis)

在上述WNCS运行过程中, 执行器的能量消耗分为: 接收数据包, D/A转换; 传感器的能量消耗分为: 传感器采样, 读取ADC采样数据, 传输数据包; 控制器的能量消耗分为: 接收数据包, 计算控制量, 发送数据包. 由文献[4]可知, 节点传输一个数据包

需要消耗电量20 nAh, 接收一个数据包需要8 nAh, 进行一次模拟采样需要1.08 nAh, 读取ADC采样数据一次需要0.011 nAh. 另外, 传输信息时要比执行计算时消耗更多能量. 传输1 bit信息100 m距离需要的能量大约相当于执行3000条计算指令消耗的能量. 根据假设1及以上分析可得:

1) 在运行过程中, 控制器能得到能量补充, 执行器与传感器则不可.

2) 在传感器传输数据量与执行器接收数据量相等的条件下, 传感器消耗的能量是执行器节点消耗能量的2.5倍.

3) 传感器消耗的能量中, 传输数据能量消耗占90%以上.

结论 在WNCS中传感器消耗的能量最大, 从而控制传感器的能量消耗对提高无线网络生命周期具有关键作用, 并且控制传感器的数据发送量是一种有效方法.

2.3 传感器采样周期与生存时间的关系 (Relationship between sensor sampling period and span)

在WNCS中, 传感器每次发送一个数据包所消耗的能量可由下式表示^[3]:

$$E(\text{packet}) = b * \text{packet_size} + c,$$

其中: b 为能量消耗系数; c 为节点每次发送数据包的固定能量消耗值.

假设传感器采用单包传输, 每采样一次就发送一个数据包, 且不存在数据包重发现象, 则传感器的生存时间 \hat{L} 可用下式表示:

$$\hat{L} = \sum_{i=1}^{\text{sum}} (t(i) - t(i-1)),$$

其中: $\text{sum} = \lfloor E_{\text{init}}/E(\text{packet}) \rfloor$, 表示传感器能够发送的数据包总量; E_{init} 表示传感器的初始能量值; $t(i), i \in \{1, 2, \dots\}$ 表示传感器发送第 i 个数据包的时刻; $t(0)$ 表示传感器开始工作的时刻. 由上式可知: 若增大传感器发送数据包的时间间隔, 即增大采样周期, 则传感器生存时间增大; 反之, 传感器生存时间减小. 根据这个结论, 设计传感器采样周期调节策略, 当传感器生存时间预测值大于生存时间期望值 L_e 时, 保持或减小采样周期; 反之, 增大采样周期.

3 采样周期调节策略 (Sampling period adjusting strategy)

自适应采样周期调节策略预先存储在传感器中, 传感器的工作流程如图2所示. 采样周期等时

间间隔更新, 更新周期为 T_M . 当第 j 个采样周期更新时刻 $t_M(j)$ 到来时, 传感器采样当前剩余能量为 $E_{\text{rem}}(j)$, 并结合前一个更新周期保存的能量数据 $E_{\text{rem}}(j-1)$, 预估节点的生存时间 $\hat{L}(j)$, 并依此计算新的采样周期, 此采样周期值延用至下一更新周期到来. 采样周期的选取不是任意的, 采样周期的上界必须满足系统稳定性的要求, 下界需保证网络资源可调度. 下面将给出确定采样周期上下界的方法.

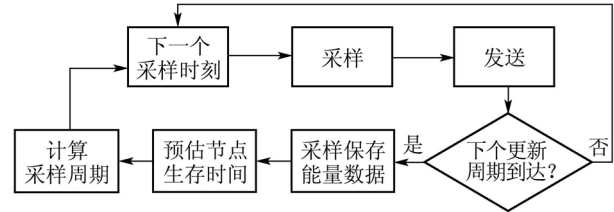


图2 传感器的工作流程图

Fig. 2 Work flow of sensor node

3.1 采样周期下界 (Sampling period lower bound)

对于每个更新周期内传感器的最大采样速率, 即采样周期下界, 以 T_{min} 表示, 由下式给定^[5]:

$$T_{\text{min}} = \frac{S_{\text{mc}} * 2 * N}{Q},$$

$$Q = \frac{S_{\text{mc}}}{T_{\text{DIFS}} + (CW_{\text{min}} * T_{\text{SIFS}}/2) + T_{\text{frame}} + T_{\text{SIFS}} + T_{\text{ACK}}},$$

$$T_{\text{frame}} = \frac{S_{\text{PHY}}}{R_1} + \frac{S_{\text{ACK}} + S_{\text{mc}}}{R_t},$$

$$T_{\text{ACK}} = \frac{S_{\text{PHY}} + S_{\text{ACK}}}{R_1}.$$

其中: R_t 为载荷传输速度; R_1 为基础传输速度; S_{mc} 为信号数据包大小; S_{PHY} 为物理层控制帧头大小; S_{ACK} 为媒体接入控制层控制头; S_{ACK} 为ACK数据大小, TCP数据包首部中的确认标志, 对已接收到的TCP报文进行确认; T_{SIFS} 为802.11b协议中最短的时间区段, 用以间隔需要立即回应的讯框; T_{DIFS} 为802.11b协议中用以间隔分散协调功能传送之讯框的时间区段; CW 为竞争窗口. 802.11b无线网络在直接序列扩频收发系统中的参数见表1.

3.2 采样周期上界 (Sampling period upper bound)

采样周期上界为使系统保持稳定的最大采样间隔, 以 T_{max} 表示, 可利用以下迭代计算的方法获得 T_{max} 的近似值:

Step 1 令 $q = 1$, 采样周期上界假设值为2倍的 T_{min} , 即 $T_{\text{max}}(q) = 2T_{\text{min}}$. 若能够求出使系统稳定的控制器, 即满足下一节中定理1的条件, 则进入Step 2. 否则进入Step 3;

Step 2 令 $q = q + 1$, $T_{\max}(q) = 2T_{\max}(q - 1)$. 若能够求出使系统稳定的控制器, 则循环运行 Step 2; 否则 $T_{\max} = T_{\max}(q - 1)$;

Step 3 令 $T_{\max}(q) = (1 + (3/4)^q)T_{\min}$, 若不能求出使系统稳定的控制器, 则令 $q = q + 1$, 且循环运行 Step 3; 否则 $T_{\max} = T_{\max}(q)$.

表 1 802.11b 无线网络在直接序列扩频收发系统中的参数

Table 1 Wireless parameters of 802.11b in direct sequence spread spectrum communication

参数	值
R_t	5.5 Mbps
R_L	1 Mbps
T_{SIFS}, T_{DIFS}	10, 50, 20 μ s
S_{ACK}, S_{PHY}	34, 24 bytes
S_{mc}	80 bytes
S_{ACK}	14 bytes+PHY header
CW_{\min}, CW_{\max}	32, 1024

3.3 采样周期候选值(Candidates for sampling period)

在区间 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 中, 利用下式选择传感器的采样周期样本:

$$T_l = 2^l * T_{\min},$$

$$l \in \mathbb{Z} \rightarrow \{0, 1, \dots, \lfloor \log_2(\frac{T_{\max}}{T_{\min}}) \rfloor\}.$$

定义 T_l 为系统的 l 级采样周期.

3.4 基于生存时间的采样周期调节策略 (Sampling period adjusting strategy based on span)

首先, 综合节点剩余能量以及能耗速度, 本文采用下式预估节点的生存时间:

$$\hat{L}(j + 1) = [t_M(j + 1) - t(0)] + \frac{(E_{\text{rem}}(j + 1) - E_{\text{out}}) * T_M}{R_{\text{ET}}}, \quad (1)$$

其中:

$$R_{\text{ET}} = (1 - \alpha)[E_{\text{rem}}(j - 1) - E_{\text{rem}}(j)] + \alpha[E_{\text{rem}}(j) - E_{\text{rem}}(j + 1)] = (1 - \alpha)E_{\text{rem}}(j - 1) + (2\alpha - 1)[E_{\text{rem}}(j) - \alpha E_{\text{rem}}(j + 1)],$$

α 为加权系数, E_{out} 为系统要求节点达到期望生存时间时所剩能量.

在第一个更新周期内, 式(1)中的 R_{ET} 值由于信息量不够无法获得, 因此不对节点生存时间进行

预估.

然后, 基于节点生存时间预估值, 设计采样周期的调节算法. 给定节点初始能量, 根据节点能耗速度的快慢, 可以将节点能量消耗速度分成 4 个区域, 如图 3 所示. 图中, 横坐标代表节点的生存时间, g 为小于 1 的常数, h 为大于 1 的常数. 纵坐标代表节点能量, 3 条虚线分别代表分隔不同区域的能耗速度, 斜率越大能耗速度越快, 生存时间越短. 根据能耗处于不同的区间, 分别设定相应的采样周期值, 通过动态调节采样周期, 达到延长节点生存时间的目的.

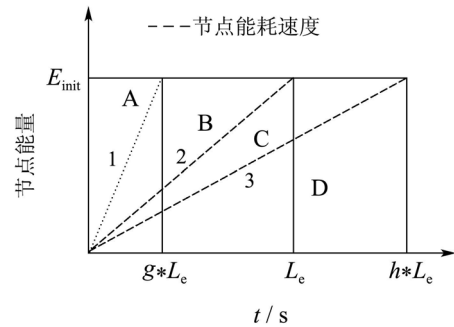


图 3 节点能量消耗速度区域图

Fig. 3 Energy consumption region of sensor node

1) 若 $\hat{L}(j + 1) \leq g * L_e$, 则能耗速度对应的斜率大于虚线 1 的斜率, 此时节点能量消耗处于 A 区域中, 以当前的能耗速度和能量与生存时间的需求相差较大, 故在当前更新周期内, 节点以最大采样周期 T_{\max} 运行;

2) 若 $g * L_e < \hat{L}(j + 1) < L_e$, 能耗速度对应的斜率位于虚线 1 和虚线 2 的斜率之间, 此时节点能量消耗处于 B 区域中, 以当前的能耗速度和能量, 生存时间小于期望值, 故当前更新周期内, 节点采样周期增大一级;

3) 若 $L_e < \hat{L}(j + 1) < h * L_e$, 能耗速度对应的斜率位于虚线 2 和虚线 3 的斜率之间, 此时节点能量消耗处于 C 区域中, 能量能够满足生存时间需要且略有富余, 保持采样周期不变;

4) 若 $\hat{L}(j + 1) \geq h * L_e$, 能耗速度对应的斜率小于虚线 3 的斜率, 此时节点能量消耗处于 D 区域中, 节点能耗速度较慢, 能量富余较多, 故采样周期减小一级.

说明 g 和 h 的取值大小取决于初始能量和生存时间期望值以及实际系统设计的需求. 当 $\frac{T_{\min} E_{\text{init}}}{E(\text{packet})}$ 与 L_e 相

比很小时, g 可在 $[\frac{T_{\min} E_{\text{init}}}{E(\text{packet})}, 1)$ 间适当取较大的值, 以增加系统以 T_{\max} 采样的机会, 从而延长节点生存时间; 当 $\frac{T_{\min} E_{\text{init}}}{E(\text{packet})}$ 与 L_e 相比很大时, 可在 $(1, \frac{T_{\min} E_{\text{init}}}{E(\text{packet})}]$ 间取适当

的整数, 尽量增加采样频率, 充分利用节点能量满足控制性能需求.

4 WNCS的稳定性分析(Stability analysis of WNCS)

4.1 WNCS切换系统模型(Switched system model of WNCS)

考虑被控对象为如下线性连续时间系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $x(t) \in \mathbb{R}^n, u(t) \in \mathbb{R}^m, y(t) \in \mathbb{R}^p, A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m}, C \in \mathbb{R}^{p \times n}$.

若第 k 个采样周期时刻系统采样周期为 $l(k)$ 级, 则考虑采样周期和网诱导时延的影响, 按采样周期 $T_{l(k)}$ 离散化后的系统如下式所示:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Psi_{l(k)}x(k) + \Gamma_{l(k)}u(k - \tau(k)), \\ y(k) &= Cx(k). \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\Psi_{l(k)} = e^{AT_{l(k)}}, \Gamma_{l(k)} = \int_0^{T_{l(k)}} e^{At}dtB, l(k) \in \Omega$. 令 $\bar{\theta} = \lceil \frac{\tau_{\max}}{T_{\min}} \rceil$, 则 $\tau(k) \in \mathbb{Z} \rightarrow \Theta = \{0, \dots, \bar{\theta}\}$.

4.2 WNCS控制器设计(Controller design of WNCS)

考虑系统具有下式所示的反馈控制增益:

$$u(k) = K_{\gamma(k)}x(k), \gamma(k) \in \Omega,$$

代入式(3)得闭环系统方程如下:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Psi_{l(k)}x(k) + K_{\gamma(k)}x(k - \tau(k)), \\ y(k) &= Cx(k). \end{aligned}$$

令 $z(k) = [x^T(k) \dots x^T(k - \bar{\theta})]^T$, 则

$$z(k+1) = (\bar{A}_{l(k)} + \bar{B}_{l(k)}\bar{K}_{\gamma(k), \tau(k)})z(k),$$

其中:

$$\bar{A}_{l(k)} = \begin{bmatrix} \Psi_{l(k)} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \mathbf{I} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_{l(k)} = [\Gamma_{l(k)}^T \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0],$$

$$\bar{K}_{\gamma(k), \tau(k)} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad K_{\gamma(k)} \quad 0 \quad \dots \quad 0],$$

$K_{\gamma(k)}$ 位于 $\bar{K}_{\gamma(k), \tau(k)}$ 矩阵的第 $\tau(k) + 1$ 列.

令

$$H_{l(k), \gamma(k), \tau(k)} = \bar{A}_{l(k)} + \bar{B}_{l(k)}\bar{K}_{\gamma(k), \tau(k)},$$

则

$$z(k+1) = H_{l(k), \gamma(k), \tau(k)}z(k). \quad (4)$$

控制系统在一个更新周期 T_M 中的信号流程如图4所示. 图中, 确定阶段指控制器与当前更新周期中的采样周期相匹配的时间段, 即 $\gamma(k) = l(k)$; 反之, 不确定阶段中控制器与采样周期不匹配, 即 $\gamma(k) \neq l(k-1)$.

若 Δ_{\max}^m 表示一个更新周期内系统滞留在不确定阶段的最大采样次数; Δ_{\min}^m 表示一个更新周期内系统滞留在不确定阶段的最小采样次数; Δ^n 表示一个更新周期内系统滞留在确定阶段最小采样次数. 则 $\Delta_{\max}^m = \bar{\theta}, \Delta_{\min}^m = 0, \Delta^n = \lfloor \frac{T_M - \tau_{\max}}{T_{\max}} \rfloor$.

若 $\Delta^n < 0$, 说明系统有可能在一个更新周期内都处于不确定阶段. 为了使系统在更新周期内至少有一个采样周期的时间位于确定阶段, T_M 使用下式取值:

$$T_M = \max\{ \lceil \tau_{\max} \rceil, \lceil \Delta^n T_{\max} + \tau_{\max} \rceil \}.$$

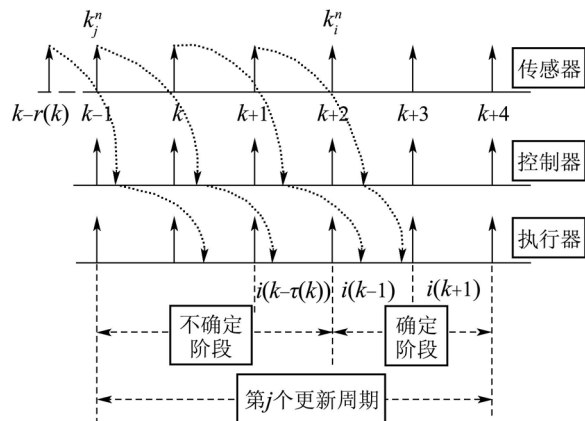


图4 一个更新周期内WNCS信号流程图

Fig. 4 Signal flow of WNCS in one update period

定理1 当同时满足以下两个条件时, 式(4)所示的闭环控制系统保持渐近稳定.

条件1 存在变量 $\theta_n > 0, \theta_m > 0$ 以及对称正定矩阵 $P_{(l, \tau)}^n, P_{(l, \gamma, \tau)}^m$ 满足以下不等式:

$$H_{(l, \gamma, \tau)}^T P_{(l, \gamma, \tau)}^m H_{(l, \gamma, \tau)} - \theta_m P_{(l, \gamma, \tau)}^m < 0, \quad (5)$$

$$H_{(l, l, \tau)}^T P_{(l, \tau)}^n H_{(l, l, \tau)} - \theta_n P_{(l, \tau)}^n < 0, \quad (6)$$

其中 $\forall (l, \gamma, \tau) \in \Phi = \Omega \times \Omega \times \Theta$.

条件2 令

$$\rho_n = \frac{\max_{(l, \tau) \in \Omega \times \Theta} \text{eig}_{\max}(P_{(l, \tau)}^n)}{\min_{(l, \tau) \in \Omega \times \Theta} \text{eig}_{\min}(P_{(l, \tau)}^n)},$$

$$\rho_m = \frac{\max_{(l, \gamma, \tau) \in \Phi} \text{eig}_{\max}(P_{(l, \gamma, \tau)}^m)}{\min_{(l, \gamma, \tau) \in \Phi} \text{eig}_{\min}(P_{(l, \gamma, \tau)}^m)},$$

$$\theta_n^* = \min \theta_n, \theta_m^* = \min \theta_m,$$

其中: $\text{eig}_{\max}(X)$ 表示矩阵 X 的最大特征值; $\text{eig}_{\min}(X)$ 表示矩阵 X 的最小特征值. 则 Δ^n 需满足

以下不等式:

$$\rho_n \cdot \rho_m \cdot (\theta_n^*)^{\Delta^n} \cdot (\theta_m^*)^{\bar{\theta}} < 1, \theta_m^* \geq 1, \quad (7)$$

$$\rho_n \cdot \rho_m \cdot (\theta_n^*)^{\Delta^n} < 1, \theta_m^* < 1. \quad (8)$$

证 为书写简便, 将 $P_{(l,\tau)}^n, P_{(l,\gamma,\tau)}^m, \text{eig}_{\max}(P_{(l,\tau)}^n), \text{eig}_{\min}(P_{(l,\tau)}^n), \text{eig}_{\max}(P_{(l,\gamma,\tau)}^m), \text{eig}_{\min}(P_{(l,\gamma,\tau)}^m)$ 分别简记为 $P_n, P_m, P_n^{\max}, P_n^{\min}, P_m^{\max}, P_m^{\min}$.

构造以下两个Lyapunov函数:

$$V_n(k) = z^T(k)P_n z(k),$$

$$V_m(k) = z^T(k)P_m z(k),$$

满足以下关系式:

$$\begin{aligned} \min(P_n^{\min})\|z(k)\|^2 &< V_n(k) < \\ \max(P_n^{\max})\|z(k)\|^2, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \min(P_m^{\min})\|z(k)\|^2 &< V_m(k) < \\ \max(P_m^{\max})\|z(k)\|^2. \end{aligned} \quad (10)$$

假设 k_0, k_1 是处于同一个阶段内的两个时刻, 由式(5)(6)可得

$$V_n(k_1) < (\theta_n^*)^{k_1-k_0} V_n(k_0), \quad (11)$$

$$V_m(k_1) < (\theta_m^*)^{k_1-k_0} V_m(k_0). \quad (12)$$

联合式(9)和式(11)可得

$$\begin{aligned} \min(P_n^{\min})\|z(k_1)\|^2 &< \\ (\theta_n^*)^{k_1-k_0} \max(P_n^{\max})\|z(k_0)\|^2. \end{aligned} \quad (13)$$

联合式(10)和式(12)可得

$$\begin{aligned} \min(P_m^{\min})\|z(k_1)\|^2 &< \\ (\theta_m^*)^{k_1-k_0} \max(P_m^{\max})\|z(k_0)\|^2, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\|z(k_1)\|^2 < \begin{cases} \rho_n \cdot (\theta_n^*)^{k_1-k_0} \|z(k_0)\|^2, & \forall (l, \tau) \in \Omega \times \Theta, \\ \rho_m \cdot (\theta_m^*)^{k_1-k_0} \|z(k_0)\|^2, & \forall (l, \gamma, \tau) \in \Phi. \end{cases}$$

若 $k_{j,m}$ 表示第 j 个更新周期中控制系统进入不确定阶段的时刻; $k_{j,n}$ 表示第 j 个更新周期中控制系统进入确定阶段的时刻, 则

$$\begin{aligned} \Delta_{\min}^m &\leq k_{j,n} - k_{j,m} \leq \Delta_{\max}^m, \\ k_{j+1,m} - k_{j,n} &\geq \Delta^n. \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} \|z(k_{j+1,m})\|^2 &< \\ \rho_n \rho_m (\theta_n^*)^{k_{j+1,m}-k_{j,n}} \cdot (\theta_m^*)^{k_{j,n}-k_{j,m}} \|z(k_{j,m})\|^2. \end{aligned}$$

因为控制器增益 $K_{\gamma(k)}$ 能使式(3)所示闭环控制系统在采样周期为 $T_{\gamma(k)}$ 的情况下达到Schur稳定, 即 $V_n(k)$ 为严格单调递减函数且衰减速度上界为 θ_n^* , 故 $\theta_n^* < 1$. 所以可得下列不等式:

$$\begin{aligned} (\theta_n^*)^{k_{j+1,m}-k_{j,n}} &\leq (\theta_n^*)^{\Delta^n}, \\ (\theta_m^*)^{k_{j,n}-k_{j,m}} &\leq \begin{cases} (\theta_m^*)^{\Delta_{\max}^m}, & \theta_m^* > 1, \\ (\theta_m^*)^{\Delta_{\min}^m}, & \theta_m^* \leq 1. \end{cases} \end{aligned}$$

故

$$\|z(k_{j+1,m})\|^2 < \begin{cases} \rho_n \rho_m (\theta_n^*)^{\Delta^n} \cdot (\theta_m^*)^{\Delta_{\max}^m} \|z(k_{j,m})\|^2, & \theta_m^* > 1, \\ \rho_n \rho_m (\theta_n^*)^{\Delta^n} \cdot (\theta_m^*)^{\Delta_{\min}^m} \|z(k_{j,m})\|^2, & \theta_m^* \leq 1. \end{cases}$$

又 $\Delta_{\min}^m = 0$, 所以当式(6)(7)成立, 有

$$\|z(k_{j+1,m})\|^2 < \|z(k_{j,m})\|^2,$$

从而, 式(4)所示切换系统是渐近稳定的.

5 仿真分析(Simulation analysis)

仿真采用如下线性系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} -1 & -0.1 \\ 0 & 0.95 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} -0.15 \\ -0.43 \end{bmatrix} u(t), \\ x(0) &= [-5 \quad 5]^T, \tau_{\max} = 0.0045 \text{ s}, \end{aligned}$$

传感器在零时刻开始工作 $t(0) = 0 \text{ s}$, 且初始能量 $E_{\text{init}} = 0.15 \text{ J}$, $E_{\text{out}} = 0.02 \text{ J}$, 生存时间期望值 $L_e = 60 \text{ s}$. 设传感器单位传输能量保持 25 dbm 不变, 且传感器位于坐标(0, 50)处, 控制器位于坐标(0, 0)处. $\alpha = 0.8, g = 0.1, h = 1.1$.

采用 MATLAB7.0 和 LUND 工学院开发的 Truetime1.5 仿真平台, 系统通过 IEEE.802.11b 无线网络闭合. 另外, 根据采样周期上下限确定方法可得: $T_{\min} = 1 \text{ ms}$, $T_{\max} = 256 \text{ ms}$; 根据 3.3 节所提方法选取采样周期样本值, $M = 9$, 且根据定理 1 中的条件(1), 求得控制器增益如表 2 所示.

表 2 采样周期与控制器增益表

Table 2 Sampling period and control gain

t/s	控制器增益	t/s	控制器增益
0.001	[10.34 10.62]	0.002	[8.72 6.92]
0.004	[6.66 6.27]	0.008	[5.71 5.92]
0.016	[5.17 5.39]	0.032	[4.72 4.85]
0.064	[4.33 4.52]	0.128	[3.90 4.02]
0.256	[3.78 3.82]	—	—

根据定理 1 中的条件(2)得 $\Delta_{\max}^m = \bar{\theta} = 5, \Delta^n = 10$, 所以取 $T_M = 3 \text{ s}$.

仿真结果如图 5~7 所示. 由图 5 可知, 当运行时间到达 60 s 时, 传感器已满足节点生存时间期望值. 此时, 传感器的剩余能量为 0.02 J, E_{out} 值相等, 符合设计要求. 由于采样周期调节策略的作用, 传感器在 0 s~30 s 之间, 消耗能量约为 0.8 J; 在 30 s~60 s 之间, 消耗能量约为 0.5 J. 由图 6 可知, 系统每 3 s 进行一次节点生存时间预测, 并作相应的

采样周期调节. 另外, 由图7可知, 根据定理1设计的控制器能够使切换系统在具有不确定切换信号的条件达到稳定.

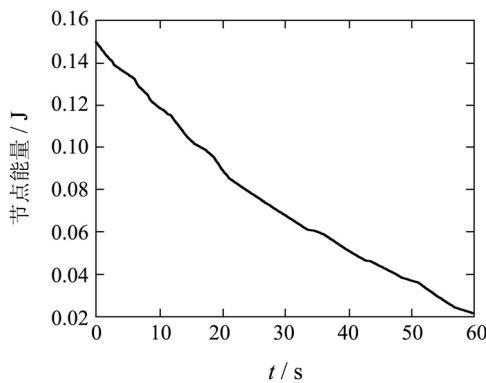


图5 节点能量图

Fig. 5 Energy of sensor node

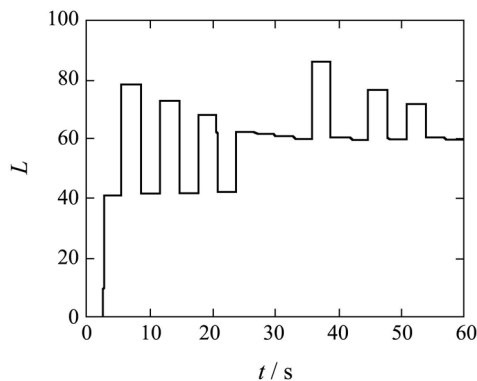


图6 节点生存时间预测图

Fig. 6 Life prediction of sensor node

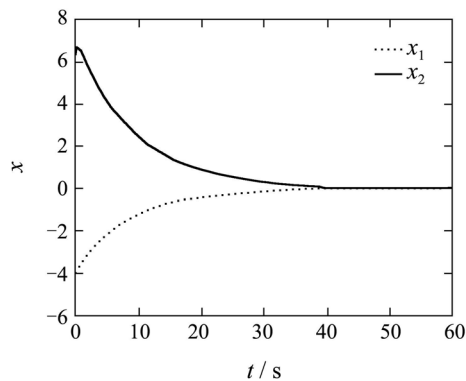


图7 系统状态响应图

Fig. 7 State response of system

6 结束语(Conclusion)

本文立足研究无线网络系统中节点能量受限的解决方案. 通过分析WNCS的运行过程, 可知传感器能量控制最为关键. 根据采样周期与能量消耗之间的关系, 提出一种基于变采样周期的节点能耗控制策略, 以此实现节点生存时间的控制. 然后将WNCS建模为一类具有不确定切换信号的离散切换系统, 分析了系统的稳定性. 最后通过仿真论证本文所提的能量调度与控制协同设计方法能在保证系统稳定的前提下, 有效控制网络节点的生存时间.

参考文献(References):

- [1] COLANDAIRAJ J, IRWIN G W, SCANLON W G. A co-design solution for wireless feedback control[C] // *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*. London, UK: IEEE Service Center, 2007: 404 – 409.
- [2] LIANG W, YANG Y. Maximizing battery life routing in wireless Ad Hoc networks[C] // *Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences*. Hawaii, USA: IEEE Computer Society Press, 2004: 1 – 8.
- [3] KIM D, DANTU K, PEDRAM M. lifetime prediction routing in mobile Ad Hoc networks[C] // *Proceedings of the IEEE Wireless Communication and Networking Conference*. New Orleans, LA, USA: IEEE Communications Society Press, 2003: 1185 – 1190.
- [4] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 35 – 49.
(SUN Limin, LI Jianzhong, CHEN Yu, et al. *Wireless Sensor Network*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 35 – 49.)
- [5] COLANDAIRAJ J, IRWIN G W, SCANLON W G. Wireless networked control systems with QoS-based sampling[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2007, 1(1): 430 – 438.
- [6] HETEL L, IUNG C. Stability analysis for discrete time switched systems with temporary uncertain switching signal[C] // *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, LA, USA: IEEE Computer Society, 2007: 5623 – 5628.
- [7] NIKOLAKOPOULOS G, TZES P A, LYGEROS A. Multi-hopping induced gain scheduling for wireless networked controlled systems[J]. *Asian Journal of Control*, 2007, 9(4): 450 – 457.

作者简介:

王艳 (1978—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为网络控制、无线传感器网络, E-mail: wangyan@jiangnan.edu.cn;

纪志成 (1959—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为非线性控制与智能控制, E-mail: zcji@jiangnan.edu.cn.